

УДК 543.272.2

*Л.П. Олексенко, Г.В. Федоренко, Н.П. Максимович***ГАЗОЧУТЛИВІ ВЛАСТИВОСТІ АДСОРБЦІЙНО-НАПІВПРОВІДНИКОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНОГО МАТЕРІАЛУ $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$** **Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна**

Нанорозмірні церієві матеріали на основі олово діоксиду з добавкою стибію, що синтезовані золь-гель методом, досліджені як газочутливі шари адсорбційно-напівпровідникових сенсорів, призначених для вимірювання вмісту водню у повітрі. Встановлено, що створені на основі синтезованих наноматеріалів сенсори виявляють високу чутливість до мікроконцентрацій водню (44 ppm H_2), що може обумовлюватися високодисперсним станом оксидів церію і стибію в утвореному наноматеріалі при одночасному їх введенні в ході синтезу. Показано, що сенсори на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ мають хорошу швидкодію, відтворюваність вимірювань, широкий діапазон детектування водню (10–1000 ppm H_2), а залежність величини електричного опору сенсора від концентрації водню в логарифмічних координатах є прямолінійною, що має здешевити періодичне калібрування сенсора в умовах його експлуатації. Виявлено відносно високу селективність сенсора щодо вимірювання водню стосовно CH_4 . Створені у роботі сенсори на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ є перспективними для вимірювання вмісту водню в повітрі, оскільки вони мають вдвічі вищу чутливість до H_2 при значно меншому енергоспоживанні ($P=280$ мВт) порівняно з сенсорами, у газочутливий матеріал яких церій вводився методом просочування з використанням розчинів CeCl_3 ($P=450$ мВт).

Ключові слова: адсорбційно-напівпровідникові сенсори, водень, наноматеріали, $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$, чутливість, селективність.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-130-3-134-139

Вступ

На сьогоднішній день для здійснення контролю стану повітря навколишнього середовища актуальною задачею є розробка газових сенсорів вибухонебезпечних газів, зокрема водню. Перспективним для вимірювання концентрації водню у повітрі є використання адсорбційно-напівпровідникових сенсорів, принцип дії яких базується на зміні їх електричного опору в присутності газу, що аналізується [1]. Чим більшою є така зміна, тим вищою є чутливість сенсора. Процес формування чутливості сенсора до H_2 пов'язаний зі зміною кількості кисню, що хемосорбований з повітря на нагрітому газочутливому шарі сенсора, внаслідок перебігу на ньому каталітичної реакції окиснення водню [1].

Для створення газочутливого шару адсорбційно-напівпровідникових сенсорів перспективним є використання SnO_2 – напівпровідника n-типу, який має хімічну інертність при підвище-

них температурах [2]. Відомо [1,3,4], що добавки до діоксиду олова каталізаторів, можуть збільшувати чутливість сенсорів до водню, а введенням до SnO_2 стибію можна регулювати величину електричного опору сенсорів на повітрі внаслідок утворення донорних рівнів в забороненій зоні напівпровідника [5].

Для збільшення чутливості сенсорів до водню ефективним в якості активної добавки може бути діоксид церію CeO_2 за рахунок як високої його каталітичної активності, так і завдяки високій рухливості кисню в його кристалічній решітці [6]. Важливим фактором впливу на чутливість сенсора є також морфологія матеріалу його газочутливого шару, яка, в свою чергу, залежить від методу його отримання і умов формування. Зокрема, використання наноматеріалів, для яких характерним є велике співвідношення величини поверхні до об'єму [7], має забезпечити вищу чутливість сенсорів за рахунок

збільшення внеску в об'ємні властивості таких матеріалів процесів, що відбуваються на їх поверхні. Відомо [1], що саме поверхневі процеси (адсорбція, десорбція, каталіз) мають вирішальне значення у формуванні чутливості сенсорів. Крім цього, у випадку нанокompatитних систем може реалізовуватися різний характер розподілу активних компонентів у матеріалі газочутливого шару сенсора, що також впливатиме на його чутливість.

Метою роботи є створення адсорбційно-напівпровідникового сенсора на основі нанорозмірного матеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ та дослідження його газочутливих властивостей до водню.

Експериментальна частина

Синтез матеріалу нанорозмірного церійованого (3 мас.% Ce) діоксиду олова з добавкою стибію (0,15 мас.% Sb) проводили з використанням золь-гель технології. В хімічний стакан при неперервному перемішуванні вносили 3 г олово(II) оксалату, 10 мл 30% розчину пероксиду водню та необхідний об'єм розчину стибію(III) хлориду для одержання 0,15 мас.% Sb в кінцевому нанокompatиті. Після утворення колоїдного розчину через 2 год в реакційну суміш вносили 7 мл концентрованої азотної кислоти та необхідний об'єм розчину церій(III) ацетату для одержання 3,0 мас.% Ce в кінцевому нанокompatиті. Далі реакційну суміш упарювали до повного видалення води та сушили при 90°C впродовж 20 год. Формування кристалічного нанорозмірного матеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ виконували в ході високотемпературного оброблення ксерогелю в атмосфері повітря при 600°C.

Одержаний матеріал змішували з органічною зв'язуючою речовиною (суміш лимонної кислоти та ПЕГ-400) до утворення однорідної пасти і наносили її на керамічні плати розміром 1,8×1,8×0,3 мм, які містили платиновий нагрівач з одного боку і вимірювальні платинові електроди, між якими розміщали газочутливий шар з іншого. Спікання газочутливого матеріалу проводили в атмосфері повітря у високотемпературній печі при ступінчастому програмованому її нагріванні до кінцевої температури 600°C. Після спікання сенсори розпаювали у спеціальні цокілі, які підключали до електричного стенду для вимірювання параметрів сенсорів [8].

Для стабілізації параметрів, сенсори, що були нагрітими при температурі 400°C, попередньо тренували, періодично подаючи на них суміш повітря і водню (концентрація H_2 – 1000 ppm).

Як міру чутливості сенсорів (γ) використо-

ували відношення R_0/R_{H_2} , де R_0 – величина електричного опору сенсора на повітрі, а R_{H_2} – величина електричного опору сенсора в газоповітряній суміші з вмістом 44 ppm H_2 . Аналогом температури сенсора була потужність нагрівача сенсора.

Швидкодію сенсора ($t_{0,9}$) визначали як час досягнення 90% сталого значення сигналу сенсора при заміні повітря, що оточує сенсор, на воднево-повітряну суміш із заданим вмістом водню.

Газові суміші, що використовувались, готували і атестували в балонах під тиском в Укрметрестстандарті. Швидкість подачі газу, що аналізувався, була однаковою і дорівнювала 400 мл/хв.

Для визначення відтворюваності вимірювань сигналу сенсора до певної концентрації водню на нагрітий сенсор впродовж дня з періодичністю 1 раз на годину подавали суміш повітря з 44 ppm H_2 . Відтворюваність сигналу сенсора оцінювали за зміною характеристик сенсора (ΔA), а саме, за зміною величини електричного опору на повітрі (ΔR_0) та зміною величини чутливості ($\Delta \gamma$) сенсора до 44 ppm H_2 протягом дня за відношенням до величини відповідної характеристики сенсора на початку вимірювань. Зміну характеристик сенсора (ΔA) визначали за формулою

$$\Delta A = \frac{A_i - A_1}{A_1} \cdot 100\%,$$

де A_1 – величина електричного опору або чутливості сенсора на початку вимірювань; A_i – i -та величина електричного опору або чутливості сенсора в процесі вимірювань.

Фазовий склад зразків досліджували за допомогою дифрактометра Bruker D8 Advance (Bruker, Німеччина) з випромінюванням CuK_α .

Результати та обговорення

Згідно з даними рентгенофазового аналізу на дифрактограмі синтезованого наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$, що містив 3 мас.% Ce та 0,15 мас.% Sb, були виявлені рефлекси лише діоксиду олова (ICDD PDF-2 Version 2.0602 (2006), card no. 00-041-1445). Окремої фази оксидів стибію та церію в дифрактограмі дослідженого зразка виявлено не було, найімовірніше, через низький вміст допуючих елементів. Слід зазначити, що незважаючи на значно більший вміст церій діоксиду в наноматеріалі (3 мас.% CeO_2) порівняно з вмістом стибію (0,15 мас.%), рефлекси, що відповідають цій фазі,

не проявляються, можливо через її високодисперсний стан церій діоксиду в одержаному наноматеріалі. При цьому наявність у дифрактограмі уширених рефлексів SnO_2 свідчить про нанорозмірність матеріалу: середній розмір його кристалітів, розрахований за рівнянням Шеррера [9], складає 9 нм.

Дослідження величини електричного опору на повітрі сенсорів, створених на основі наноматеріалів $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ без домішок стибію, показало, що при порівняно низьких потужностях нагрівача сенсора ($P=190$ мВт) величина його опору на повітрі сягає більше 55 МОм (табл.). Збільшення потужності нагрівача сенсора до 350 мВт приводить до значного зменшення величини опору сенсора, але вона залишається достатньо великою, що може ускладнювати коректне вимірювання сигналу сенсора. Для зменшення електричного опору сенсора на повітрі до складу матеріалу вводили 0,15 мас. % Sb.

Як видно з таблиці, наявність стибій оксиду у складі матеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--Sb}_2\text{O}_5$ газочутливого шару сенсора значно зменшує величину його електричного опору при всіх потужностях нагрівача сенсора. Це відбувається за рахунок утворення донорних рівнів домішок стибію в забороненій зоні напівпровідника, що значно збільшує кількість електронів в його зоні провідності [5]. Слід зазначити, що введення стибію до складу газочутливого матеріалу сенсора приводить також і до незначного підвищення його чутливості до мікроконцентрацій водню. Причиною цього може бути збільшення кількості хемосорбованого кисню, що бере участь в каталітичному окисненні водню на повітрі і, тим самим, впливає на формування чутливості сенсорів [1]. В свою чергу, збільшення кисню, хемосорбованого на поверхні сенсора, є наслідком збільшення кількості електронів провідності та дефектів в матеріалі його газочутливого шару

завдяки наявності введеного стибію.

Як видно з таблиці, чутливість до водню сенсорів, створених на основі синтезованих наноматеріалів $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ та $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--Sb}_2\text{O}_5$, при збільшенні потужності нагрівача від 190 до 280 мВт збільшується, а при подальшому зростанні температури – зменшується. Така зміна чутливості може бути обумовлена процесами адсорбції–десорбції кисню, які обумовлюють зміну швидкості окиснення водню на поверхні газочутливого шару сенсора [10,11] і тим самим безпосередньо впливають на величину чутливості сенсора. Встановлено, що найбільшу чутливість виявляє сенсор, створений на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--Sb}_2\text{O}_5$ при потужності нагрівача 280 мВт (таблиця). Слід зазначити, що швидкодія до 44 ppm H_2 у найбільш чутливого сенсора складає 57 с, що є зіставним з характеристиками відомих аналогів [12,13].

Дослідження зміни величини сигналу найбільш чутливого сенсора при різних концентраціях водню показало, що він може вимірювати H_2 в широкому діапазоні концентрацій (10–1000 ppm). Крім цього, залежність величини електричного опору сенсора від концентрації водню в логарифмічних координатах має вигляд прямої (рис. 1). Саме тому періодичне калібрування, яке зазвичай необхідно здійснювати при довготривалій роботі приладу на основі адсорбційно-напівпровідникового сенсора, можна здійснити з використанням лише двох воднево-повітряних сумішей з різними концентраціями H_2 і це значно здешевлює експлуатацію приладів на основі таких сенсорів на практиці.

Для оцінювання можливості селективного вимірювання вмісту водню у повітрі була досліджена чутливість сенсорів у сумішах повітря з 1000 ppm CO , CH_4 , C_3H_8 , $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ при потужності нагрівача сенсора 280 мВт. Як видно з рис. 2, наявність метану практично не заважає вимірюванню водню. Щодо інших газів (CO ,

Величини електричного опору на повітрі та чутливості до водню створених на основі наноматеріалів $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ та $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--Sb}_2\text{O}_5$ сенсорів при різних потужностях їх нагрівача

P, мВт	R_o , кОм		γ (44 ppm H_2)	
	Газочутливий матеріал сенсора		Газочутливий матеріал сенсора	
	3% $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$	3% $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--}0,15\%$ Sb_2O_5	3% $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$	3% $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{--}0,15\%$ Sb_2O_5
350	7178	442	4,8	5,9
320	12689	748	6,1	7,6
280	23370	1168	6,4	8,3
250	32710	1434	5,2	6,8
220	45465	1612	3,3	5,1
190	55167	1726	1,8	3,1

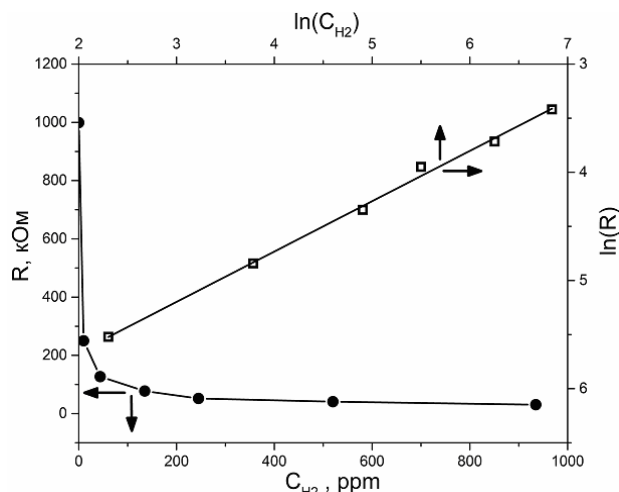


Рис. 1. Залежність величини електричного опору сенсора на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ від концентрації водню (C_{H_2}) в лінійній та логарифмічній шкалах. Потужність нагрівача сенсора 280 мВт

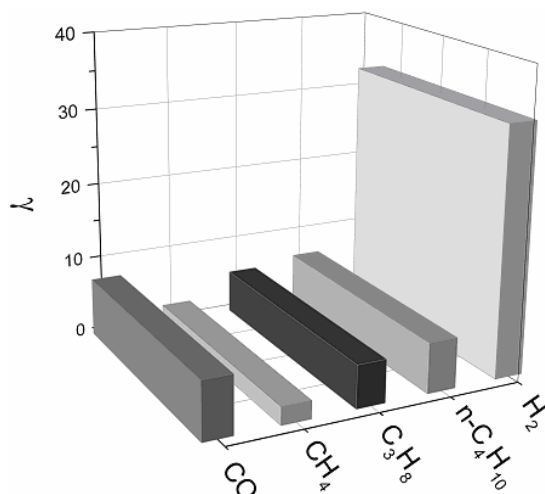


Рис. 2. Чутливість сенсора на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ до H_2 , CO , C_3H_8 та $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$ у повітрі. (Концентрація газів – 1000 ppm, потужність нагрівача сенсора – 280 мВт)

C_3H_8 та $\text{n-C}_4\text{H}_{10}$), то певну інтерференцію при вимірюванні 1000 H_2 вони можуть давати.

У той же час така одночасна чутливість створеного сенсора до різних газів може мати і свої переваги, зокрема при використанні його у складі матриці («електронного носу» [14]), що дозволяє за допомогою відносно селективних сенсорів значно підвищувати абсолютну селективність вимірювання кожного з газів, що є присутніми у газовій суміші.

Однією з найважливіших характеристик сенсора, яка визначає можливість його викори-

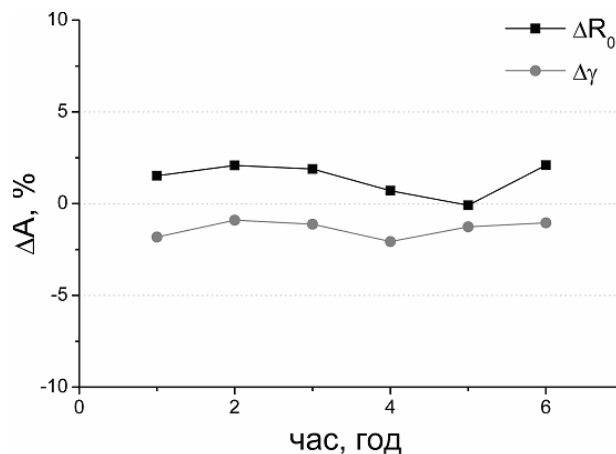


Рис. 3. Зміна характеристик (ΔA) – величини електричного опору на повітрі (ΔR_0) та величини чутливості ($\Delta \gamma$) до 44 ppm H_2 сенсора на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ протягом дня при потужності нагрівача сенсора 280 мВт

стання на практиці, є відтворюваність його вимірювань. Як видно з рис. 3, величини електричного опору на повітрі та чутливості сенсора, створеного на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$, практично не змінюються протягом дня його безперервної роботи. Зміни величин електричного опору на повітрі (ΔR_0) та чутливості ($\Delta \gamma$) сенсора в ході вимірювань за відношенням до їх початкових значень не перевищують 2,5%, що свідчить про стабільність сенсора та забезпечує належну відтворюваність вимірювань.

Співставлення чутливості сенсора, створеного на основі наноматеріалу $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$, одержаного золь-гель методом при одночасному введенні прекурсорів ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, CeCl_3 , SbCl_3) в ході синтезу, з найбільш чутливим церієвмісним сенсором на основі наноматеріалу $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$ [15], в який церій вводили методом просочування з розчину CeCl_3 , показало вдвічі більшу чутливість першого, що досягається, найімовірніше, завдяки високодисперсному стану церій діоксиду в наноматеріалі газочутливого шару сенсора. Крім цього, створений сенсор виявляє максимальну чутливість при значно меншому енергоспоживанні ($P=280$ мВт) у порівнянні з церієвмісним сенсором ($P=450$ мВт) [15], що є його безумовною перевагою.

Висновки

Таким чином, синтезовані золь-гель методом нанорозмірні церієвмісні матеріали на основі діоксиду олова з добавкою стибію можуть бути використані в якості газочутливого шару

адсорбційно-напівпровідникових сенсорів. Висока чутливість до мікроконцентрацій водню сенсорів створених на основі матеріалів досягається при одночасному введенні прекурсорів церію, олова та стибію під час синтезу, що забезпечує високодисперсний стан їх оксидів в наноматеріалі газочутливого шару сенсора. Показано, що сенсори, створені на основі $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ мають широкий діапазон детектування водню, хорошу швидкодію та відтворюваність вимірювань концентрації водню. Виявлено відносно високу селективність сенсора щодо вимірювання водню по відношенню до CH_4 . Сенсори створені у роботі мають вищу чутливість до водню при значно нижчому енергоспоживанні порівняно з сенсорами, у газочутливий матеріал яких церій вводився методом просочування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Geckeler K.E., Rosenberg E.* Functional nanomaterials. – Valencia: American Scientific Publishers, 2006. – 515 p.
2. *Nanocrystalline tin dioxide: basics in relation with gas sensing phenomena. Part I. Physical and chemical properties and sensor signal formation / Marikutsa A.V., Rumyantseva M.N., Gaskov A.M., Samoylov A.M.* // *Inorg. Mater.* – 2015. – Vol.51. – No. 13. – P.1329-1347.
3. Adsorption-semiconductor hydrogen sensors based on nanosized tin dioxide with cobalt oxide additives / Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Buvailo A.I., Matushko I.P., Dollahon N. // *Sens. Actuators, B.* – 2012. – Vol.174. – P.39-44.
4. *Study of influence of palladium additives in nanosized tin dioxide on sensitivity of adsorption semiconductor sensors to hydrogen / Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Sokovykh E.V., Matushko I.P., Buvailo A.I., Dollahon N.* // *Sens. Actuators, B.* – 2014. – Vol.196. – P.298-305.
5. *Conduction mechanism in undoped and antimony doped SnO₂ based FSP gas sensors / Rebholz J., Bonanati P., Jaeschke C., Hubner M., Madler L., Weimar U., Barsan N.* // *Sens. Actuators, B.* – 2013. – Vol.188. – P.631-636.
6. *Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials / Montini T., Melchionna M., Monai M., Fornasiero P.* // *Chem. Rev.* – 2016. – Vol.116. – P.5987-6041.
7. *Roduner E.* Size matters: why nanomaterials are different // *Chem. Soc. Rev.* – 2006. – Vol.35. – No. 7. – P.583-592.
8. *Semiconductor adsorption sensors based on nanosized Pt/SnO₂ materials and their sensitivity to methane / Fedorenko G.V., Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P.* // *Russ. J. Phys. Chem., A.* – 2015. – Vol.89. – No. 12. – P.2259-2262.
9. *Hammond C.* The basics of crystallography and diffraction. – Oxford: Oxford University Press, 2009. – 542 p.
10. *Influence of conditions of Pd/SnO₂ nanomaterial formation on properties of hydrogen sensors / Sokovykh E.V., Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P.* // *Nanoscale Res. Lett.* – 2017. – Vol.12. – Article No. 383.
11. *Effect of SnO₂ particle size on the hydrogen sensitivity of adsorption-semiconductor sensors with CoxOy/SnO₂ active coating / Buvailo A.I., Oleksenko L.P., Maksimovich N.P., Matushko I.P., Ripko A.P., Ruchko V.P.* // *Theor. Exp. Chem.* – 2010. – Vol.46. – No. 3. – P.153-157.
12. Resistive-type hydrogen gas sensor based on TiO₂: a review / Li Z., Yao Z., Haidry A.A., Plecenik T., Xie L., Sun L., Fatima Q. / *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2018. – Vol.43. – No. 45. – P.21114-21132.
13. *Nasirian S., Moghaddam H.M.* Polyaniline assisted by TiO₂:SnO₂ nanoparticles as a hydrogen gas sensor at environmental conditions // *Appl. Surf. Sci.* – 2015. – Vol.328. – P.395-404.
14. *Evaluation of hydrocarbon soil pollution using e-nose / Bieganski A., Jozefaciuk G., Bandura L., Guz L., Lagod G., Franus W.* // *Sensors.* – 2018. – Vol.18. – Article No. 2463.
15. *Nanosized sensor materials based on CeO₂/SnO₂-Sb₂O₃ / Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P., Chubaevskaya N.V.* // *Russ. J. Phys. Chem., A.* – 2015. – Vol.89. – No. 3. – P.472-476.

Надійшла до редакції 24.02.2020

GAS SENSITIVE PROPERTIES OF ADSORPTION SEMICONDUCTOR SENSOR BASED ON NANOSIZED MATERIAL $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$

L.P. Oleksenko *, *G.V. Fedorenko*, *N.P. Maksymovych*
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
* e-mail: olexludmil@ukr.net

Nanosized cerium-containing materials based on tin dioxide with the addition of antimony were synthesized by a sol-gel method and studied as gas-sensitive layers of adsorption-semiconductor sensors intended for measuring the content of hydrogen in air. It was found that the sensors created using the synthesized nanomaterials demonstrated high sensitivity to microconcentrations of hydrogen (44 ppm H₂), which may be resulted from a highly dispersive state of cerium and antimony oxides in the formed nanomaterial when introducing them simultaneously in the process of synthesis. It was shown that sensors based on nanomaterial $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ have good response time, reproducibility of measurements and a wide range of detecting hydrogen (10–1000 ppm H₂). The dependence of the electric resistance of the sensor on the hydrogen concentration in logarithmic scale is linear, which should make cheaper the periodical calibration of the sensor in conditions of its operation. It was observed relatively high selectivity of the sensor to hydrogen measurement in relation to CH₄ measurement. The sensors created based on the nanosized $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ are promising to measure hydrogen in air because they have twice the sensitivity to H₂ with significantly lower power consumption (P=280 mW) as compared with the sensors prepared by impregnation of a gas sensitive layer with CeCl₃ solution (P=450 mW).

Keywords: adsorption-semiconductor sensors; hydrogen; nanomaterials; $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$; sensitivity; selectivity.

REFERENCES

1. Geckeler K.E., Rosenberg E., *Functional nanomaterials*. American Scientific Publishers, Valencia, 2006. 515 p.
2. Marikutsa A.V., Rummyantseva M.N., Gaskov A.M., Samoylov A.M. Nanocrystalline tin dioxide: basics in relation with gas sensing phenomena. Part I. Physical and chemical properties and sensor signal formation. *Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, pp. 1329-1347.
3. Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Buvailo A.I., Matushko I.P., Dollahon N. Adsorption-semiconductor hydrogen sensors based on nanosized tin dioxide with cobalt oxide additives. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, vol. 174, pp. 39-44.
4. Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Sokovykh E.V., Matushko I.P., Buvailo A.I., Dollahon N. Study of influence of palladium additives in nanosized tin dioxide on sensitivity of adsorption semiconductor sensors to hydrogen. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, vol. 196, pp. 298-305.
5. Rebholz J., Bonanati P., Jaeschke C., Hubner M., Madler L., Weimar U., Barsan N. Conduction mechanism in undoped and antimony doped SnO₂ based FSP gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 188, pp. 631-636.
6. Montini T., Melchionna M., Monai M., Fornasiero P. Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials. *Chemical Reviews*, 2016, vol. 116, pp. 5987-6041.
7. Roduner E. Size matters: why nanomaterials are different. *Chemical Society Reviews*, 2006, vol. 35, pp. 583-592.
8. Fedorenko G.V., Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P. Semiconductor adsorption sensors based on nanosized Pt/SnO₂ materials and their sensitivity to methane. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 89, pp. 2259-2262.
9. Hammond C., *The basics of crystallography and diffraction*. Oxford University Press, Oxford 2009. 542 p.
10. Sokovykh E.V., Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P. Influence of conditions of Pd/SnO₂ nanomaterial formation on properties of hydrogen sensors. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12, article no. 383.
11. Buvailo A.I., Oleksenko L.P., Maksimovich N.P., Matushko I.P., Ripko A.P., Ruchko V.P. Effect of SnO₂ particle size on the hydrogen sensitivity of adsorption-semiconductor sensors with Co_xO_y/SnO₂ active coating. *Theoretical and Experimental Chemistry*, 2010, vol. 46, pp. 153-157.
12. Li Z., Yao Z., Haidry A.A., Plecenik T., Xie L., Sun L., Fatima Q. Resistive-type hydrogen gas sensor based on TiO₂; a review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, pp. 21114-21132.
13. Nasirian S., Moghaddam H.M. Polyaniline assisted by TiO₂:SnO₂ nanoparticles as a hydrogen gas sensor at environmental conditions. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 328, pp. 395-404.
14. Bieganski A., Jozefaciuk G., Bandura L., Guz L., Lagod G., Franus W. Evaluation of hydrocarbon soil pollution using e-nose. *Sensors*, 2018, vol. 18, article no. 2463.
15. Oleksenko L.P., Maksymovych N.P., Matushko I.P., Chubaevska N.V. Nanosized sensor materials based on CeO₂/SnO₂-Sb₂O₃. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2015, vol. 89, pp. 472-476.